

フリッカに基づく光源分離と固有画像分解の不定性の解決 Resolving Ambiguity in Light Source Separation and Intrinsic Image Decomposition

吉田 雄作[†] 川原 僚[‡] 岡部 孝弘[‡]
Yusaku Yoshida Ryo Kawahara Takahiro Okabe

1. はじめに

我々の身の回りにある電源は交流電源であるため、その電圧は周期的に変化している。交流電源に接続されて動作している光源の明るさは、電圧の変化に同期して肉眼ではとらえられないほど高速に振動している[1]。この振動はフリッカと呼ばれており、高速度カメラなどを用いて短時間露光撮影することで捉えることができる。

このフリッカを利用した画像解析技術として、Sheininら[2]は複数の光源に照らされたシーンを、各光源のみに照らされた基底画像に分離する光源分離手法を提案している。フリッカに同期して撮影が可能な自作カメラや光源に関する事前知識を用いることで様々なシーンに対して頑健な光源分離を実現している。

これに対して大屋ら[7]は、非負値行列因子分解(Non-negative Matrix Factorization : NMF)[3]を用いた光源分離手法を提案している。Sheininら[2]の手法とは異なり自作カメラや事前知識などを必要としないため、短時間露光撮影可能なカメラのみを用いて光源分離を実現することが可能である。さらに、光源分離によって得られた基底画像を反射率画像、照度画像、光源色に解析的に分離する固有画像分解手法を提案している。しかし、光源分離と固有画像分解の各々に不定性があり、前者では基底画像と光源の明るさを、後者では反射率と光源の色を一意に推定することができない。

本研究では、大屋ら[7]のそれぞれの手法に存在している不定性を解消できる手法を示す。光源分離の不定性は基底画像の混合比率であることに基づき、固有画像分解と組み合わせることで不定性の解消を行う。また固有画像分解では、鏡面反射を考慮した固有画像分解手法を提案する。提案手法は、鏡面反射成分を手掛かりとして不定性を解決するだけでなく、鏡面反射を含むより一般的なシーンに適用可能であるという利点もある。

2. 関連研究

2.1 フリッカと光源分離

前述したように、交流電源で動作する光源にはフリッカと呼ばれる明るさの振動が存在する。このフリッカは高速度カメラなどを用いた短時間露光撮影によって捉えることができ、撮影された連続画像を用いた画像処理技術が提案されている。Sheininら[2]は、フリッカを手掛かりにして複数の交流光源に照らされたシーンを単一光源下の画像に分解する光源分離手法を提案している。電圧の変化に同期して撮影できる自作のカメラと、様々な光源のフリッカの振動パターンと光源色をまとめたデータベースをそれぞれ

提案・利用することで、夜間などの低照度シーンに対しても頑健な光源分離を実現している。

大屋ら[7]は NMF を用いることで、自作カメラや事前知識を必要としない光源分離手法を提案している。複数の光源に照らされたシーンを撮影した動画は、各光源のみに照らされた基底画像と各光源の明るさとの積で表現できる。これらの各要素が全て非負値であることから、NMF を用いて光源分離を行うことが可能になる。

しかし、一般に NMF によって得られる行列間には任意の正方行列とその逆行列で表される不定性があることが知られている。本研究では、後述する固有画像分解と組み合わせることでこの不定性を解消する。

2.2 固有画像分解

固有画像分解[4][5][6]とは、入力画像を物体表面の反射率を画素値とする反射率画像と、光源の放射や相互反射、陰影などに依存する陰影画像に分解する問題である。推定された固有画像は様々な応用に利用でき、例として反射率画像は物体認識や領域分割に、陰影画像は形状復元などに有用である。単一画像からこの分解問題を解く場合、拘束に対して未知数の方が多くなる不良設定問題となる。これに対して、従来研究では Retinex 理論に基づく手法[5]、補助画像を用いる手法[6]などが提案されている。

大屋らの手法では、光源分離によって得られる複数の画像を入力とすることでこの不良設定問題を解決している。入力とする基底画像は同一シーンを撮影しているため、画像間の反射率が共通となる。また、同一基底画像内で光源色が一定となる。これらの前提を踏まえ、基底画像の画素値を反射率、光源色、照度の積で表現する。ここにスケーリングを適用することで拘束が未知数を上回るため、全てのパラメタを解析的に求めることが可能となる。

しかし、この手法には鏡面反射が考慮されていないという問題点が存在する。本研究では NMF による光源分離を前提に、鏡面反射を考慮した固有画像分解手法を提案する。これにより、高精度な固有画像分解と同時に反射率と光源色の間に存在していた色に関する不定性の解消を実現する。

3. 提案手法

3.1 光源分離とその不定性

時刻 t ($t = 1, 2, \dots, T$) の画像における画素 p ($p = 1, 2, \dots, P$) の画素値(RGB の 3次元ベクトル) \mathbf{i}_{pt} は

$$\mathbf{i}_{pt} = \sum_{n=1}^N \mathbf{b}_{pn} a_{nt} \quad (1)$$

のように表せる。ここで、 N はシーンを照らしている光源の数、 \mathbf{b}_{pn} は n 番目の基底画像における画素 p の画素値、 a_{nt} は n 番目の光源の時刻 t における明るさである。式(1)は行列を用いて

[†]九州工業大学大学院情報工学府先端情報工学専攻

Kyushu Institute of Technology

[‡]九州工業大学大学院情報工学府知能情報工学研究系 Kyushu Institute of Technology

$$\mathbf{I} = \mathbf{B}^{(t)} \mathbf{A}^{(t)} \quad (2)$$

のように表すことができる。ここで、 \mathbf{I} は $(3P \times 1)$ の縦ベクトルで表現した入力画像を並べた $(3P \times T)$ の行列、 $\mathbf{B}^{(t)}$ は基底画像を並べた $(3P \times N)$ の行列、 $\mathbf{A}^{(t)}$ は光源強度を並べた $(N \times T)$ の行列となる。このとき全ての要素が非負値であるため、NMFを用いて光源分離を行うことができる。

ところが実際には、NMFを用いた光源分離には不定性がある。具体的には

$$\mathbf{I} = \mathbf{B}^{(t)} \mathbf{X} \mathbf{X}^{-1} \mathbf{A}^{(t)} \quad (3)$$

のように、式(2)の $\mathbf{B}^{(t)}$ と $\mathbf{A}^{(t)}$ の間に $(N \times N)$ の正則行列 \mathbf{X} とその逆行列 \mathbf{X}^{-1} の積を挟んでも左辺は不変である。したがって、NMFによって得られる推定値は真値に不定性行列が掛かった $\mathbf{B}^{(e)} = \mathbf{B}^{(t)} \mathbf{X}$ 、 $\mathbf{A}^{(e)} = \mathbf{X}^{-1} \mathbf{A}^{(t)}$ となる。

3.2 固有画像分解とその不定性

従来手法[7]では、シーンの反射特性がランバートモデルに従うと仮定している。このとき、 \mathbf{b}_{pn} は反射率 $r_p = (r_{pR}, r_{pG}, r_{pB})^T$ と光源色 $\mathbf{l}_n = (l_{nR}, l_{nG}, l_{nB})^T$ を用いて、

$$\mathbf{b}_{pn} = d_{pn} \begin{pmatrix} r_{pR} & 0 & 0 \\ 0 & r_{pG} & 0 \\ 0 & 0 & r_{pB} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_{nR} \\ l_{nG} \\ l_{nB} \end{pmatrix} \quad (4)$$

のようにモデル化できる。ここで、 d_{pn} は拡散反射強度を表す。従来手法では、基底画像に上記のモデルを当てはめることで、シーン中の点に固有(基底画像間で共通)の反射率、光源に固有(シーン中で一様)な光源色、および、画素と光源の両方に依存する拡散反射強度を推定している。

ところが固有画像分解にも不定性がある。具体的には、

$$\mathbf{b}_{pn} = d_{pn} \begin{pmatrix} r_{pR} & 0 & 0 \\ 0 & r_{pG} & 0 \\ 0 & 0 & r_{pB} \end{pmatrix} \mathbf{Y} \mathbf{Y}^{-1} \begin{pmatrix} l_{nR} \\ l_{nG} \\ l_{nB} \end{pmatrix} \quad (5)$$

のように、式(4)の反射率と光源色の間に (3×3) の対角行列 \mathbf{Y} とその逆行列 \mathbf{Y}^{-1} の積を挟んでも左辺は不変である。よって推定される反射率と光源色はそれぞれ $\mathbf{R}_p \mathbf{Y}$ 、 $\mathbf{Y}^{-1} \mathbf{l}_n$ となる。拡散反射成分のみの画素から行列 \mathbf{Y} によって表現される不定性を解消することはできないため、従来手法では $\mathbf{l}_1 = (1/3, 1/3, 1/3)^T$ に固定している。さらに、従来手法は光源分離の不定性を無視して固有画像分解を行っているため、一般に推定精度は低くなる。

3.3 光源分離の不定性の解決

式(3)において不定性行列 \mathbf{X} の m 行 n 列成分を x_{mn} とすると、 $\mathbf{B}^{(e)}$ と $\mathbf{B}^{(t)}$ の n 番目の画像の p 番目の画素の画素値をそれぞれ $\mathbf{b}_{pn}^{(e)}$ 、 $\mathbf{b}_{pn}^{(t)}$ とすると以下の式が成立する。

$$\mathbf{b}_n^{(e)} = \sum_{m=1}^N \mathbf{b}_m^{(t)} x_{mn} \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{b}_n^{(t)}$ が式(4)で表現されるとき、式(6)は

$$\mathbf{b}_{pn}^{(e)} = \begin{pmatrix} r_{pR} & 0 & 0 \\ 0 & r_{pG} & 0 \\ 0 & 0 & r_{pB} \end{pmatrix} \left(\sum_{m=1}^N d_{pm} \mathbf{l}_m x_{mn} \right) \quad (7)$$

となる。 \mathbf{X} が理想的でない(単位行列でない)とき、式(7)右辺の n 番目の光源色が画素 p に依存することになり、光源色が一様であるという仮定と矛盾する。したがって、光源分離と固有画像分解を組み合わせることで不定性を解決することができる。

そこで、ここまでに述べた物理的制約に基づいた最適化によってこの不定性を解決する。3.4節にて後述する方法で推定された拡散反射成分を含む画素を用いて式(6)を解く。具体的には次のような最小化問題を考える。

$$\min_{\{\mathbf{B}^{(t)}, \mathbf{X}\}} \frac{1}{P} \|\mathbf{B}^{(r)} - \mathbf{B}^{(e)} \mathbf{X}^{-1}\|^2 + w \frac{1}{\det(\mathbf{X}^{-1})^2} \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{B}^{(r)}$ は式(4)から再構成される基底画像、 $\det(\mathbf{X})$ は正方行列 \mathbf{X} の行列式であり、 w は第1項と第2項のバランスを取るための重みである。この行列式を用いた第2項は、全ての基底画像が同一となるような自明な解への収束を回避するための項である。

3.4 固有画像分解の不定性の解決

提案手法では光源分離によって得られた基底画像の画素値 \mathbf{b}_{pn} に対して2色性反射モデル[8]を仮定する。2色性反射モデルは、観測される物体からの反射光を拡散反射成分と鏡面反射成分の線形結合で表現するモデルである。このモデルでは拡散反射成分の色は反射率と光源色に依存し、鏡面反射成分の色は光源色に依存すると考えるため、 \mathbf{b}_{pn} は式(4)を拡張した次の式によって表現される。

$$\mathbf{b}_{pn} = d_{pn} \begin{pmatrix} r_{pR} & 0 & 0 \\ 0 & r_{pG} & 0 \\ 0 & 0 & r_{pB} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_{nR} \\ l_{nG} \\ l_{nB} \end{pmatrix} + s_{pn} \begin{pmatrix} l_{nR} \\ l_{nG} \\ l_{nB} \end{pmatrix} \quad (9)$$

ここで、 s_{pn} は鏡面反射強度を表す。

式(9)に対して式(5)に示す不定性を考えると次のようになる。

$$\mathbf{b}_{pn} = d_{pn} \begin{pmatrix} r_{pR} & 0 & 0 \\ 0 & r_{pG} & 0 \\ 0 & 0 & r_{pB} \end{pmatrix} \mathbf{Y} \mathbf{Y}^{-1} \begin{pmatrix} l_{nR} \\ l_{nG} \\ l_{nB} \end{pmatrix} + s_{pn} \mathbf{Y}^{-1} \begin{pmatrix} l_{nR} \\ l_{nG} \\ l_{nB} \end{pmatrix} \quad (10)$$

このとき、鏡面反射を含む画素($s_{pn} \neq 0$)においては鏡面反射成分の色が $\mathbf{Y}^{-1} \mathbf{l}_n$ と一致するため \mathbf{Y}^{-1} を一意に決定することができる。よって、鏡面反射成分を含む画素を手掛かりにして行列 \mathbf{Y} による不定性を解決することができる。

そこで、式(9)に基づいて鏡面反射成分を含む画素を特定する。拡散反射成分のみ($s_{pn} = 0$)を仮定するとランバートモデルに帰着するため、式(4)に基づいて不定性の残るパラメタを推定できる。ここで、反射率は全ての基底画像で共通であるため、 $\mathbf{r}_{pn} = \mathbf{b}_{pn} / (d_{pn} \mathbf{l}_n)$ のように求められる反射率に対して $\mathbf{r}_{p1} = \mathbf{r}_{p2} = \dots = \mathbf{r}_{pN}$ が成立する。よって、

$$\mathbf{e}_{pnn'} = \mathbf{b}_{pn} - d_{pn} \begin{pmatrix} r_{pn'R} & 0 & 0 \\ 0 & r_{pn'G} & 0 \\ 0 & 0 & r_{pn'B} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_{nR} \\ l_{nG} \\ l_{nB} \end{pmatrix} \quad (11)$$

のように定義される $\mathbf{e}_{pnn'}$ ($n' = 1, 2, \dots, N$)について $\mathbf{e}_{pnn'} = \mathbf{0}$ が成立する。しかし、 n' 番目の基底画像が鏡面反射成分を含んでいる($s_{pn} \neq 0$)場合、式(4)によって画素値を説明できないため $\mathbf{e}_{pnn'} \neq \mathbf{0}$ となる。全ての画素について式(11)を計算することで、いずれかの n において鏡面反射成分を含む画素を特定することができる。

4. 実験

4.1 合成画像実験

提案手法の有効性の検証のために、光源数 $N = 2$ として合成画像を用いた実験を行った。画像データベース[9]内に含まれるオブジェクトの深度情報から 3 次元形状を復元し、反射率情報を合わせて 3 次元物体を構成した。この物体に対して光源色・光源方向を設定し、2 色性反射モデルに基づいて画像を作成した。画像作成に用いた反射率画像を図 1 に、作成した理想的な基底画像を図 2 に示す。以後、図 2 の左側を $n = 1$ 、右側を $n = 2$ とする。

4.1.1 光源分離の不定性解消実験

合成画像を用いて光源分離の不定性解消手法の有効性検証を行った。4.1 節にて作成した理想的な基底画像 $\mathbf{B}^{(t)}$ から鏡面反射成分を取り除いた画像と任意の不定性行列 $\mathbf{X}^{(t)}$ を用いて、式(3)に基づいて基底画像の画素値を混ぜ合わせた不定性を持つ基底画像 $\mathbf{B}^{(e)}$ を作成した。この $\mathbf{B}^{(e)}$ に対して式(4)による固有画像分解を適用し各パラメタを推定した。得られたパラメタと単位行列 $\mathbf{X}^{(e)}$ を初期値として式(8)の最適化を適用し、 $\mathbf{X}^{(t)}$ の復元実験を行った。

不定性行列の真値と推定値を表 1 に示す。初期値の単位行列に比べ、 $\mathbf{X}^{(e)}$ が $\mathbf{X}^{(t)}$ に近い値となっていることが分かる。また、推定された $\mathbf{X}^{(e)}$ を用いて不定性解消を行う前後の基底画像と $\mathbf{B}^{(t)}$ 間の二乗平均平方根誤差(Root Mean Squared Error : RMSE)を各 N に対して求めた結果を表 2 に示す。なお、基底画像の画素値は平均が 1 になるように正規化している。どちらの基底画像に対しても不定性解消後の方が RMSE の値が小さく、真値画像に近い画像が得られていることが分かる。以上より、光源分離の不定性解消手法が有効に動作していると言える。

4.1.2 固有画像分解の不定性解消実験

合成画像を用いて固有画像分解の不定性解消手法の有効性検証を行った。光源分離によって理想的な基底画像が得られたことを想定し、4.1.1 節で作成した理想的な基底画像 $\mathbf{B}^{(t)}$ を入力として 3.4 節で示した提案手法を適用した。提案手法は影の画素に対して適用できないため、あらかじめ推定した影を除去した前景内の画素にのみ処理を行う。

不定性解消前後の真値と結果について、画像と光源色の値のそれぞれを図 3、表 3 に示す。図 3 の各画像は左から真値画像、不定性解消前(従来手法適用結果)、不定性解消後(提案手法適用結果)を示している。(c)鏡面反射強度画像は従来手法では推定できないため空白となっている。図 3(a)反射率画像および表 3 の結果では、RGB の和が 1 となる正規化の影響により本来の値とは異なる値となっている。

これらの結果において、不定性解消前は光源色を固定することによって真値から大きく離れた値となっているが、不定性解消後はこの問題が解決されており真値に近い値が得られていることが分かる。(b)拡散強度画像の不定性解消前では、鏡面反射成分として推定されるべき強度が含まれているが、不定性解消後は鏡面反射強度として分離ができていくことが分かる。以上より、定性的にも定量的にも良好な結果が得られており、固有画像分解の不定性解消手法が有効に動作していると言える。



図 1 反射率画像

図 2 理想的な基底画像

表 1 不定性行列の真値と推定値

$\mathbf{X}^{(t)}$	$\mathbf{X}^{(e)}$
$\begin{pmatrix} 0.900 & 0.100 \\ 0.100 & 0.900 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.846 & 0.076 \\ 0.154 & 0.924 \end{pmatrix}$

表 2 不定性解消後の画像間の RMSE

	$RMSE(\mathbf{B}^{(t)} - \mathbf{B}^{(e)})$	$RMSE(\mathbf{B}^{(t)} - \mathbf{B}^{(e)}\mathbf{X}^{(e)^{-1}})$
$n = 1$	1.376×10^{-1}	9.129×10^{-2}
$n = 2$	6.070×10^{-2}	1.250×10^{-2}

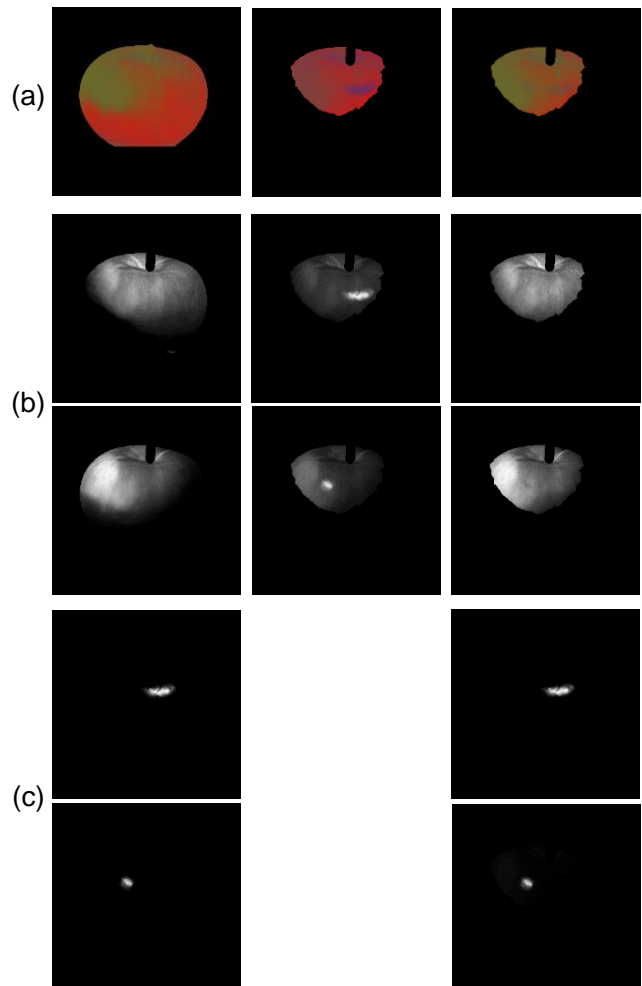


図 3 固有画像分解の不定性解消結果 : (a)反射率画像, (b)拡散強度画像, (c)鏡面強度画像. それぞれ左から真値, 解消前, 解消後の結果.

表 3 合成画像実験の光源色の真値と推定値

		R	G	B
n = 1	真値	0.379	0.189	0.432
	従来手法	0.333	0.333	0.333
	提案手法	0.381	0.189	0.430
n = 2	真値	0.422	0.348	0.230
	従来手法	0.327	0.523	0.150
	提案手法	0.434	0.350	0.216

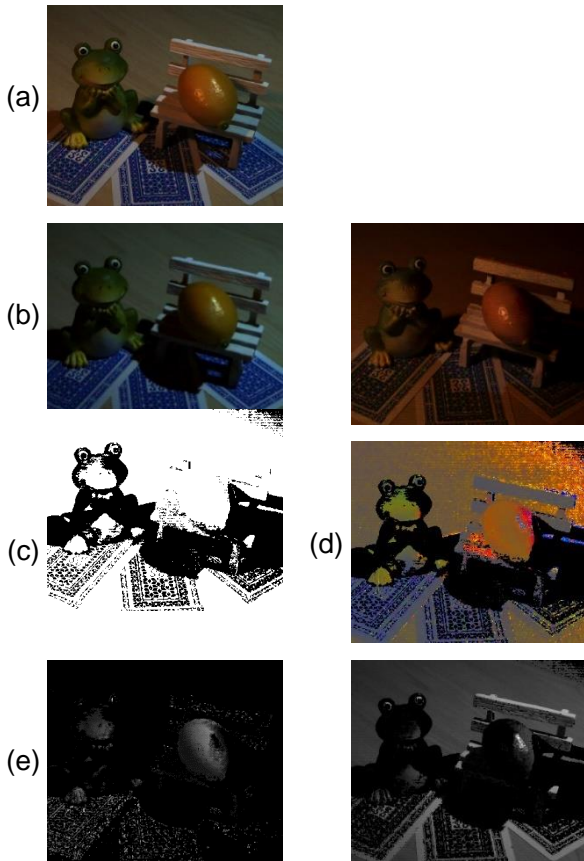


図 4 実画像実験の入力画像と推定結果画像 : (a)入力シーン画像, (b)不定性解消後の基底画像, (c)前景画像, (d)反射率画像, (e) $n = 1$ の拡散強度画像と鏡面強度画像.

表 4 実画像実験における不定性解消後の画像間の RMSE

	$RMSE(\mathbf{B}^{(t)} - \mathbf{B}^{(e)})$	$RMSE(\mathbf{B}^{(t)} - \mathbf{B}^{(e)}\mathbf{X}^{(e)-1})$
n = 1	2.676×10^{-1}	1.542×10^{-1}
n = 2	5.445×10^{-1}	4.400×10^{-1}

表 5 実画像実験の光源色の真値と推定値

		R	G	B
n = 1	真値	0.230	0.355	0.415
	推定値	0.346	0.385	0.269
n = 2	真値	0.580	0.287	0.133
	推定値	0.545	0.298	0.157

4.2 実画像実験

実画像に対しての有効性検証実験を行った. LED 光源と白熱灯光源の 2 種類の光源を用意し, それぞれ相異なる方向から対象シーンを照らした. このシーンをフォトロン社の高速度カメラ FASTCAM Mini UX50 によって撮影した. 撮影速度を 2500fps, 露光時間を $1 / 2500 [\text{sec}] = 0.4[\text{ms}]$ として 2500 枚の連続画像を獲得した. 西日本で実験を行ったため, 交流電源の周波数は 60[Hz]としている.

4.2.1 実画像実験結果

図 4(a)に示すようなシーン画像を入力として実画像実験を行った. 得られた結果画像を図 4(b)以降に示す. また, 光源分離の不定性解消後の画像間の RMSE を表 4, 光源色の真値と推定値を表 5 に示す. 表 4 における真値基底画像は各光源だけでシーンを照らした画像であり, 表 5 の光源色真値は拡散板をそれぞれの光源で照らした際の画像から推定した値である. 概ね良好な結果が得られており, 提案手法が実画像に対しても一定の有効性があることがわかる.

しかし, 表 5 における $n = 1$ の光源色が真値から離れていることが分かる. これは, 鏡面反射を含んでいる画素が中央右側の黄色い物体上にしかないため, 光源色がその反射率に引っ張られたためだと考えられる. これにより, 図 4(e)に示す拡散強度画像, 鏡面強度画像の精度が低下したと考えられる. また, 白色物体においては拡散反射の色と鏡面反射の色が等しくなるために, 拡散反射の一部が鏡面反射に含まれている.

5. むすび

本研究では NMF を用いた光源分離手法, および, これを前提とした固有画像分解手法に存在する不定性の解消についての手法を提案した. また, 合成画像と実画像を用いた実験によってその有効性を示した. ホワイトバランス調整などの応用は今後の課題である.

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP20H00612 の助成を受けた.

参考文献

- [1] N. Andersson, M. Sandstrom, A. Berglund, and K. Hansson, "Amplitude modulation of light from various sources", *Lighting Research and Technology*, 26(3):157–160, 1994.
- [2] M. Sheinin, Y. Schechner, and K. Kutulakos, "Computational imaging on the electric grid", In *Proc. IEEE CVPR2017*, pp.6437–6446, 2017.
- [3] M. Berry, M. Browne, A. Langville, V. Puaça, and R. Plemmons, "Algorithms and applications for approximate nonnegative matrix factorization", *Computational Statistics & Data Analysis*, 52(1), pp.155–173, 2007.
- [4] M. Tappen, W. Freeman, and E. Adelson, "Recovering intrinsic images from a single image", In *Advances in Neural Information Processing System*, pp.1343–1350, 2003.
- [5] E. Land and J. McCann, "Lightness and retinex theory", *JOSA*, 61(1):1–11, 1971.
- [6] R. Matsuoka, T. Baba, and M. Okuda, "Reflectance estimation and white balancing using multiple images", In *Proc. IEEE ICIP2015*, pp.407–411, 2015.
- [7] 大屋, 松岡, 岡部, "フリッカに基づく固有画像分解とその色補正への応用", FIT2019 予稿集, H-030, 2019.
- [8] S.A.Shafer, "Using color to separate reflection components", *COLOR Research and Application*, Vol.10, No.4, pp.210–218, 1985.
- [9] J. Barron, and J. Malik, "Shape, illumination, and reflectance from shading", *IEEE TPAMI*, 38(7):1670–1687, 2015.